甘肃省雷暴大风活动特征及潜势预报研究

谭　丹[1]，　聂灿齐[2,3]，　黄武斌[1]，　李文瑶[1]，　谢丽君[1]

（1. 兰州中心气象台，甘肃 兰州　730020；2. 城口县气象局，重庆　405900；
3. 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室，重庆　401147）

摘　要：利用甘肃省2017—2021年2115个气象观测站逐小时极大风速与闪电定位资料，结合欧洲中期天气预报中心集合预报数据，分析了甘肃省雷暴大风时空特征与对流参数统计特征，运用多指标叠套法开展了雷暴大风潜势预报研究。结果表明：(1) 甘肃省雷暴大风主要发生在4—9月，其中5—7月发生次数占全年的65.3%。一天中雷暴大风集中出现在15:00—21:00，17:00达到峰值，凌晨至上午发生次数极少。(2) 雷暴大风分布与地形密切相关，具有中西部多、东部少，高原多、谷地少的分布特征；雷暴大风高值区出现在甘南高原，低值区出现在陇东和陇南。雷暴大风主要以8、9级大风为主，10级以上主要出现在河西地区和甘南高原。(3) 基于对流参数和指标阈值得到了甘肃省雷暴大风的潜势预报概率产品，通过个例检验，预报落区与实际发生区域有较好的一致性，研究结果表明该方法对甘肃省雷暴大风预报具有一定的参考性。

关 键 词：雷暴大风；活动特征；潜势预报；甘肃省

文章编号：1000－6060(2024)12－2083－10(2083～2092)

雷暴大风指对流风暴中下沉气流达到地面时产生辐散，造成的地面大风[1-2]。雷暴大风空间尺度小，持续时间短，破坏力强，可摧毁林木建筑以及电力、通信等设施，阻碍航运交通，给人民生命财产造成严重威胁和损失[3-4]，如2015年6月1日在湖北监利的“东方之星”客轮遭遇下击暴流导致的强烈雷暴大风灾害，造成442人遇难，是20世纪以来我国大陆地区三大海难之一[5-6]。

随着社会经济和城市化建设的飞速发展，雷暴大风造成的损失更加严重，由于其突发性和局地性强，预报难度大。近年来，在雷暴大风的时空特征、物理机制和预报研究等方面，国内外学者开展了一系列有针对性的研究。许多学者研究发现[7-14]，我国雷暴大风多发生在夏季的午后和前半夜，且高海拔地区发生频次大于低海拔地区，具有显著的季节性、日变化和地域性特征。雷暴大风物理机制、预报预警一直是研究重点和难点。廖晓农等[15]对北京雷暴大风特征和临近预报研究表明，下沉对流有效位能、大风指数、对流层低层环境温度直减率对雷暴大风临近预报具有指示意义。柯元惠等[16]研究发现海南岛雷暴大风主要与午后热力效应和季风槽活动相关，产生雷暴大风的主要形势是西南热低压型、季风槽型和冷锋型。韦惠红等[17]指出按区域归纳各型雷暴大风的对流参数阈值，对湖北省雷暴大风预报预警更有指导意义。严仕尧等[18]、李力等[13]筛选了雷暴大风发生时的多个动力热力指标，计算了各指标阈值，建立了多指标叠套雷暴大风落区预报方法。这些研究对雷暴大风潜势预报提供了技术支撑，但目前雷暴大风形成机理、预报技术的研究多集中在我国中东部地区，针对西北地区的研究较少。

甘肃省地处西北干旱、半干旱地区，受西风带、东亚季风和高原气候影响，气象灾害种类多，局地多发短时强降水、冰雹、雷暴大风等强对流天气。

收稿日期：2024-02-22；　**修订日期：**2024-06-27
基金项目：甘肃省科技基金计划项目(22JR5RA752，23JRRA1324)；甘肃省气象局气象科学技术研究项目(Ms2022-07)资助
作者简介：谭丹(1987-)，女，本科，高级工程师，主要从事天气预报和西北强对流研究. E-mail: lz_tdian@163.com
通讯作者：聂灿齐(1990-)，男，本科，工程师，主要从事天气预报预警研究. E-mail: niecj09@sina.com

近年来甘肃省在短时强降水、冰雹预报预警取得了长足的进步，但雷暴大风仍局限于个例分析，整体性、系统性的认识不足，且甘肃省地形复杂，对流天气具有弱不稳定层结特征，与平原地区的对流天气具有显著差异，从而给甘肃省雷暴大风预报带来困难。面对认识雷暴大风进而提高预报准确率的需求，准确掌握甘肃省雷暴大风活动规律和产生机制，开展雷暴大风潜势预报研究，对提高甘肃省雷暴大风认识和预报水平具有重要的指导意义。本文利用甘肃省地面气象观测站、闪电定位资料，遴选雷暴大风过程，分析甘肃省雷暴大风时空特征，结合欧洲中期天气预报中心（ECMWF，简称EC）集合预报数据，分析雷暴大风过程对流参数统计特征，运用多指标叠套法开展雷暴大风潜势预报研究，从而为甘肃省雷暴大风预报预警提供一定的参考。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

甘肃省地形地貌复杂多样，山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁兼而有之，地势自西南向东北倾斜[19]。其中，河西走廊为西北—东南走向的狭长地带，长度约1000 km，而宽度仅数十公里，南北山之间形成较窄的狭管，易导致空气运动加速，风力加强。陇中为典型的黄土高原地貌、甘南为高海拔地区、陇东为黄土高原丘陵沟壑区、陇南高山峻岭与峡谷、盆地相间。表1为甘肃省区域划分[20-21]。

表1 甘肃省区域划分

Tab. 1 Regional division of Gansu Province

区域	自然地理区	行政区划
河西	河西	酒泉市、嘉峪关市、张掖市、金昌市、武威市
河东	陇中	兰州市、白银市、定西市、临夏州
	陇东	庆阳市、平凉市
	陇南	天水市、陇南市
	甘南	甘南州

1.2 资料说明

本文采用2017—2021年2115个气象观测站逐小时极大风地面观测资料（资料经过严格质量控制，剔除了异常值）、逐小时闪电定位资料以及EC集合预报。EC集合预报格点为1°×1°，短期预报内时间间隔为3 h，1 d起报2次。

1.3 雷暴大风判识标准和个例选取

雷暴大风实况由2017—2021年逐小时极大风观测资料和逐小时闪电资料组合筛选而成。中国气象局强对流短时预报业务中雷暴大风的判识标准为：闪电定位仪数据采用最邻近插值方法[22]累计到0.5°×0.5°（网格点经纬度为0.5°倍数）经纬度网格点上，形成小时累计闪电次数网格数据，再采用最邻近插值方法将闪电网格数据插值到检验站点。当检验站点小时累计闪电次数大于或等于1，并且该时次小时阵风风速大于或等于17 $m\cdot s^{-1}$，则判定该站出现雷暴大风。根据强度分级标准，瞬时或者阵风风速在17~24 $m\cdot s^{-1}$之间为一般雷暴大风，≥25 $m\cdot s^{-1}$为强雷暴大风[23]。

依据雷暴大风判识标准，统计得到2017—2021年甘肃省出现雷暴大风4615站次，本文雷暴大风个例筛选标准为一次过程持续时间5 h以上或一次过程总站次达10次以上，经筛选甘肃省共计出现63次区域性雷暴大风天气过程。

2 结果与分析

2.1 雷暴大风时空分布

2.1.1 雷暴大风时间变化特征 2017—2021年甘肃省雷暴大风出现站次呈波动变化，2019年出现次数最多，达1584站次。雷暴大风月变化呈现单峰分布（图1a），主要发生在4—9月，与甘肃省强对流天气多发月份一致[20]，其中5—7月发生次数占全年的65.3%，9月以后急剧减少，11月至次年2月很少有雷暴大风发生。雷暴大风在一日内各个时段均能发生（图1b），活动峰值集中在午后15:00至夜间21:00，发生次数占全天的83.2%，这主要是因为午后地面升温快，层结极不稳定，对流活动活跃，利于雷暴大风的形成和发展[12]。

2.1.2 空间分布特征 由图2可以看出，甘肃省雷暴大风空间分布特征为河西、陇中及甘南高原地区出现频次较高，陇东和陇南地区出现频次较低。雷暴大风的高值区在甘南高原，年均频次大多在3次以上，合作市上加拉站出现频次最高，达27.2次，造成此分布的主要原因是该地区海拔高、水汽充足，且经常受到高原低槽影响，极易形成对流天气，导致雷暴大风发生次数多[21,24-27]。河西、陇中地区是雷暴大风次多区域，年均频次大多为1~2次，河西走廊太

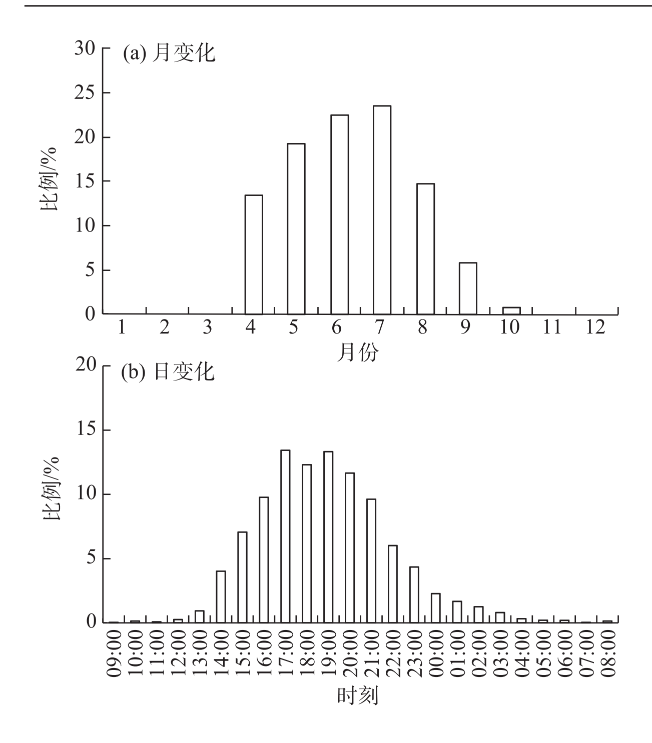
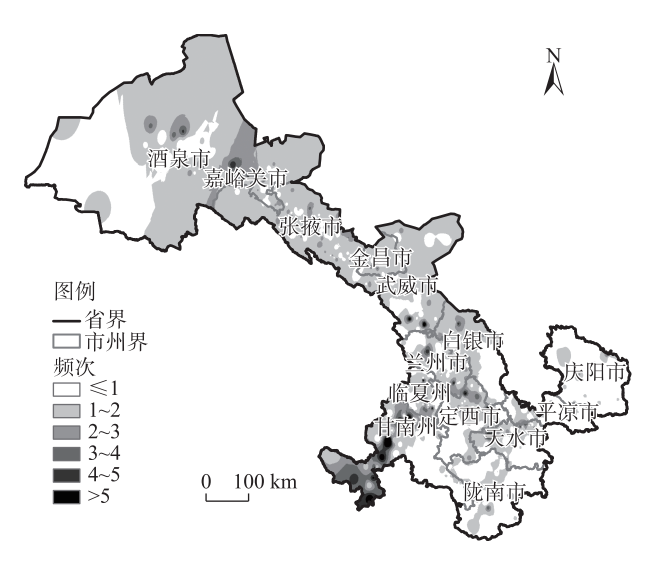


图1　2017—2021年甘肃省雷暴大风时间变化

Fig. 1　Changes of thunderstorm in Gansu Province from 2017 to 2021



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图2　2017—2021年甘肃省雷暴大风分布

Fig. 2　Distribution of the frequency of thunderstorm in Gansu Province from 2017 to 2021

阳辐射强烈，西侧祁连山区海拔高，易发生高原效应上升运动，促进对流云发展，形成地形雷暴。再加之河西走廊地形的狭管作用会使得风速加强，大风天气多，当雷暴活动产生时，配合加强的风速，易形成雷暴大风。陇中地区位于河西地区下游，受河西雷暴云向南传播的影响，陇中北部易出现雷暴大风，其次受青藏高原边坡等地形影响，夏季午后水汽和热量充沛，乌鞘岭和陇中北部一带极易产生对流云团向偏南地方移动，从而陇中南部区域易发生雷暴大风。低值区在陇南和陇东地区，年均频次在1次以下，该地区海拔较低，山谷和盆地较多，当雷暴云中下沉气流达到地面时容易受地形阻碍和摩擦作用，导致风速减小，往往达不到雷暴大风的风力等级，雷暴大风天气少。

从4—9月空间分布来看（图略），4月雷暴大风主要出现在陇中、陇南和甘南高原；5月雷暴大风频次增多，范围扩大，主要出现在河西、陇中、陇南北部和甘南高原；6月范围进一步扩大，高值区位于河西和甘南西部；7月发展到最强时期，全省大部地方均有雷暴大风出现，高值区在河西、陇中和甘南高原地区；8月雷暴大风活动范围和频次逐渐减弱，陇东和陇南减弱最为明显；9月除甘南西部外，省内其余地方很少出现雷暴大风。

造成以上差异的主要原因是4月河西部分地区还处于霜冻区，整体气温偏低不利于雷暴产生，5—6月甘肃省为春夏过渡季节，太阳辐射增加，副高北抬使西南暖湿气流输送至甘肃省南部或更偏北的地方，复杂的地形作用导致局地中小尺度对流系统发展活跃，出现雷暴大风的频次显著升高；7月夏季风盛行，甘肃省位于东亚季风的西部边缘，地面气温、水汽含量、不稳定能量等都达到一年中最强盛时期，同时也受西风带冷空气的影响，冷暖交汇使对流发展更加旺盛，易出现雷暴大风天气；8月副高发展强盛，冷空气活动偏北，偏南水汽向北输送，强对流天气往往以强降水为主，雷暴大风出现频次减少；9月气温降低，能量减弱，整体环境条件不利于产生对流，而甘南高原海拔高，风速大于低海拔地区，午后近地面升温也更快，垂直方向产生热力不稳定易造成局地出现雷暴大风。

2.2　雷暴大风强度分布

将雷暴大风强度按大风风力等级分类，从甘肃省风力极大值分布来看（图3a），雷暴大风主要以8、9级大风为主，10级风力主要分布在河西地区和甘南高原，陇东和陇南大部分地方极大风风速都在10级以下。11、12级以上风力的范围呈零星点状分布，落区分散，最强风力主要出现在兰州市南部、临夏州南部以及甘南州东部。

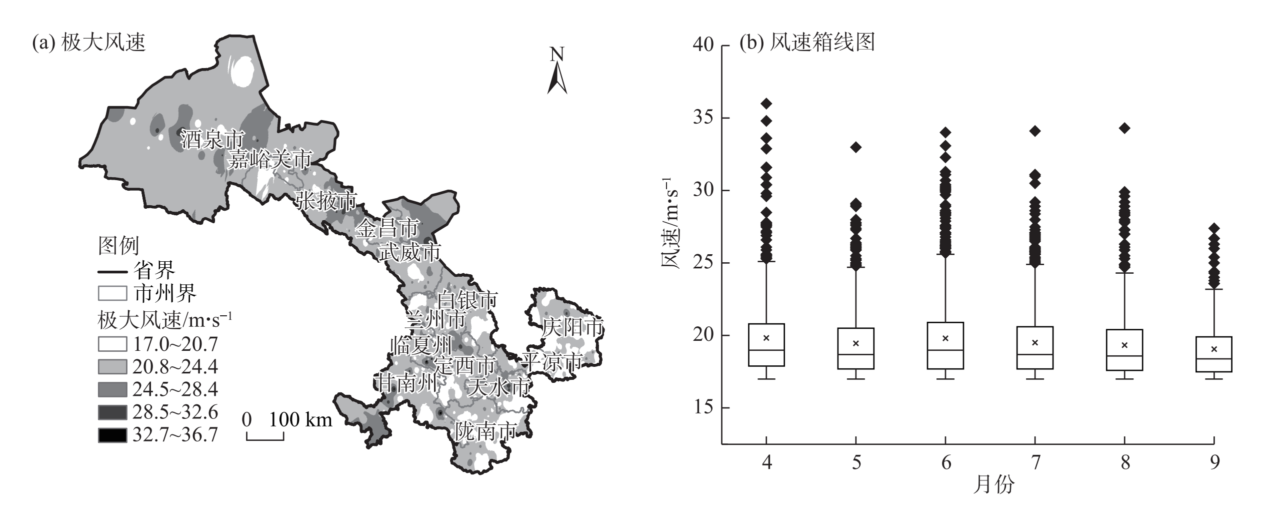


图3 甘肃省极大风速空间分布及风速箱线变化

Fig. 3 Distribution of extreme wind speed and box plot of wind speed in Gansu Province

从风速箱线图可以看到(图3b),风速超过25 m·s^{-1}(10级以上)的站次数仅占总站次的4.6%,出现频次较低,超出了控制线的上边界。控制线内4—9月的风速差异较小,仅6月风速在各分位数上略高于其他月,风速值第25%分位和第75%分位分别对应接近18 m·s^{-1}(8级)和21 m·s^{-1}(9级),中位数值在19 m·s^{-1}左右,说明风速普遍在8~9级之间,与空间分布表现一致。

2.3 雷暴大风过程对流参数统计特征分析

由上面分析可以看出,甘肃省雷暴大风季节性很强,有明显的日变化特征,雷暴大风的产生与对流系统发生发展的热力和动力环境密切相关[19,28],而表征水汽、热力和动力环境场的参数众多,根据雷暴大风实况与物理量的相关性分析,筛选出11个物理参量,包括表征水汽的参数有水汽通量(FH)、水汽通量散度(IFVQ);表征热力参数有对流有效位能(CAPE)、*K*指数、抬升指数(LI)、*A*指数、沙氏指数(SI);表征动力参数有散度(*D*)、垂直速度(*W*)。

2.3.1 对流参数统计特征 水汽通量和水汽通量散度表征水汽的输送、积聚情况。与甘肃省雷暴大风密切相关的水汽对流参数为中低层的水汽通量FH500、FH700和水汽通量散度IFVQ700、IFVQ850。对比4—9月水汽对流参数中位数指标(表2),FH500和FH700均为正值,IFVQ700和IFVQ850均为负值,表明雷暴大风发生时存在水汽的输送和辐合。FH500、FH700、IFVQ700、IFVQ850中位数指标值各月差异不明显,平均值分别为2.5 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}、2.9 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}、-0.2×10^{-5}·g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}、-0.4×10^{-5}·g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}。

表征热力不稳定的参数有很多,EC集合预报提供了常用的CAPE、*K*等指数,对甘肃省雷暴大风有较好的指示作用。由表2可见,5个相关性较好的物理量中,CAPE、*K* 2个物理量中位数在7月表现比其他月份更强,但整体对比差异不大,中位数均值分别为116.8 J·kg^{-1}、18.4 ℃。LI、*A*、SI指数在4—9月的差异也比较小,中位数均值分别为−0.8 ℃、6.5 ℃、4.5 ℃。

散度是描述水平面上速度场辐合辐散的强度,垂直速度则表示空气块的上下运动,两者对甘肃省的雷暴大风活动具有较好的相关性。通过插值运算和相关性分析,低层辐合与中层明显的上升运动配合都有利于对流发展。由表2可见,4月850 hPa层的散度和500 hPa层的垂直速度比其他月份明显偏强,而雷暴大风在4月仅出现在甘肃省中部,因此4月的动力参数阈值不具有代表性。由此,参考5—9月的中位数指标,其差异略小,中位数指标平均值分别为-0.6×10^{-5}·s^{-1}、−0.6 Pa·s^{-1}。

2.3.2 对流参数指标选取和预报方法 根据强对流天气发生需具备的3个基本条件,以及11个对流参数中位数指标平均值和经验预报,得到甘肃省雷暴大风物理量阈值指标(表3),建立多指标叠套雷暴大风天气预报模型。EC集合成员共有51个,对集合预报中的51个成员分别进行判别,再给出各格点雷暴大风发生的概率值,最后通过概率值的高低来

表2　雷暴大风物理量参数4—9月中位数指标

Tab. 2　Midrange index of water vapor convection parameters in thunderstorms from April to September

类型	物理量参数	中位数					
		4月	5月	6月	7月	8月	9月
水汽	FH500	2.5	1.8	2.7	2.8	2.7	2.4
	FH700	3.6	2.6	2.3	3.2	3.3	2.4
	IFVQ700	−0.2	−0.2	−0.2	−0.3	−0.3	−0.3
	IFVQ850	−0.5	−0.3	−0.4	−0.5	−0.3	−0.4
热力	CAPE	129.6	60.7	107.8	164.4	117.0	121.2
	K	17.1	15.1	16.8	21.9	21.3	18.0
	LI	−0.5	−0.8	0.3	−0.9	−1.1	−1.9
	A	8.6	6.3	6.1	5.5	4.5	7.7
	SI	5.6	4.9	5.3	3.8	3.9	3.7
动力	D850	−1.8	−0.8	−0.6	−0.5	−0.4	−0.7
	W500	−2.4	−0.7	−0.8	−0.7	−0.3	−0.3

注：FH500、FH700分别为500 hPa、700 hPa水汽通量（$g\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$）；IFVQ700、IFVQ850分别为700 hPa、850 hPa水汽通量散度（$10^{-5}\cdot g\cdot cm^{-2}\cdot hPa^{-1}\cdot s^{-1}$）；CAPE为对流有效位能（$J\cdot kg^{-1}$）；$K$、$A$为气团指数（℃）；LI为抬升指数（℃）；SI为沙氏指数（℃）；D850为850 hPa散度（$10^{-5}\cdot s^{-1}$）；W500为500 hPa垂直速度（$Pa\cdot s^{-1}$）。下同。

表3　雷暴大风对流参数指标阈值

Tab. 3　Threshold of thermal convection parameters in thunderstorms

参数	阈值	参数	阈值	参数	阈值
FH500	2.5	CAPE	110.0	A	6.0
FH700	2.8	K	18.4	D850	−0.6
IFVQ700	−0.2	LI	−0.7	W500	−0.6
IFVQ850	−0.4	SI	4.5		

判断出现雷暴大风的可能性。

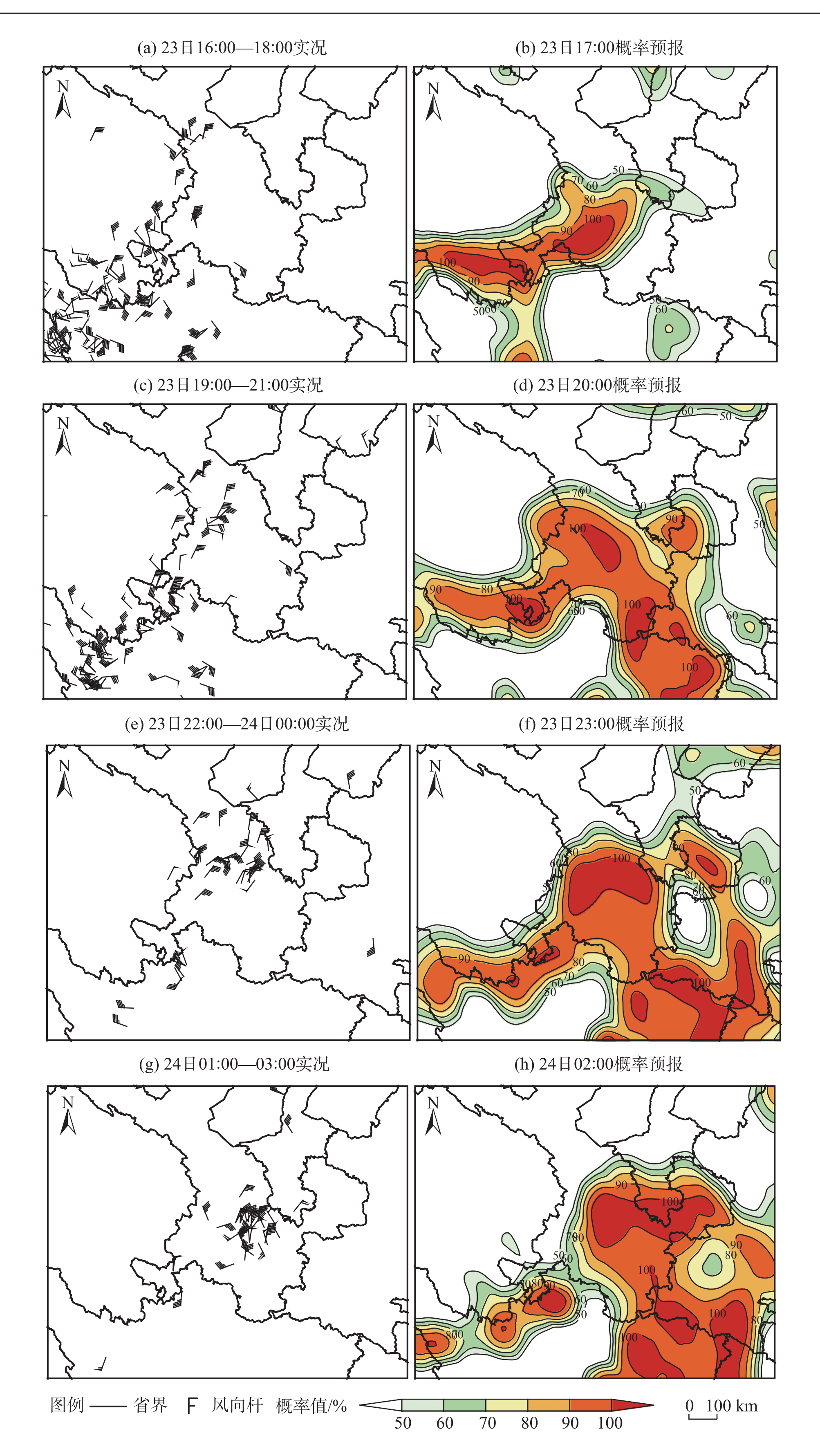
概率值（P）的表达式为：$P=\frac{m}{n}\times 100\%$，其中，$m$为同时满足11个因子的成员个数，$n$为EC集合预报成员数。当概率值≥50%时，表示出现雷暴大风的可能性较大，反之较小。

2.4　雷暴大风的潜势预报试验

为了检验使用指标叠套法的预报效果，以及所选阈值是否合理，本文选取2022年4月23日16:00至24日05:00甘肃省陇中地区、甘南高原出现的雷暴大风过程和2023年7月20日13:00—21:00甘肃省张掖市以东大部出现的雷暴大风过程，开展潜势预报试验，对实况和EC集合预报最新时次起报资料计算的概率预报产品进行对比检验。

2022年4月23日午后，受高原低涡东移影响，从青海省东部出现雷暴大风，16:00开始影响到甘肃省甘南高原，随后系统快速发展，范围影响至陇中地区，由于低涡在甘肃省南部维持时间长，雷暴大风出现站数较多，过程最大风速为28 $m\cdot s^{-1}$。图4分别展示了雷暴大风实况（左）和概率预报50%以上的落区（右）对比，实况雷暴大风为23日16:00—18:00、19:00—21:00、22:00—00:00，24日01:00—03:00，分别对应概率预报23日08:00起报到23日17:00、20:00、23:00、24日02:00。通过对比，23日16:00—21:00，雷暴大风主要出现在甘肃省武威市南部、兰州市、临夏州、甘南州等地以及青海省东南部、四川省北部（图4a、4c），概率预报在兰州市、临夏州、甘南州等地以及青海省东南部、四川省北部的概率值均在50%以上，有较好的指示意义，但对武威市南部的预报概率较小，对定西市、陇南市、平凉市等地的预报概率偏大（图4b、4d）。23日22:00至24日03:00，实况主要出现在兰州市南部、白银市、临夏州、定西市、天水市西部、平凉市西部等地（图4e、4g），对比概率预报落区，50%以上的概率落区与实况基本吻合，雷暴大风活动密集区域正好对应概率100%的区域，但对偏南和偏东地区的陇南市、天水市、平凉市、庆阳市等部分地方预报概率偏大（图4f、4h）。综上，此次过程概率预报50%以上区域与实况对应较好，雷暴大风活动密集区对应概率预报中心可达100%，并且雷暴大风的实况和预报变化趋势一致，但在陇南市、天水市、平凉市和庆阳市等地概率预报偏大，存在一定的空报。

2023年7月20日午后到夜间，受河套低涡影响，甘肃省张掖市、金昌市部分地方出现雷暴大风，随着低涡加强，雷暴大风的范围逐渐扩大，到20:00以后，雷暴大风发展到陇东南地区。图5为雷暴大



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图4　2022年4月23日—24日雷暴大风实况和概率预报

Fig. 4　Observations and probability prediction of thunderstorms on April 23-24, 2022

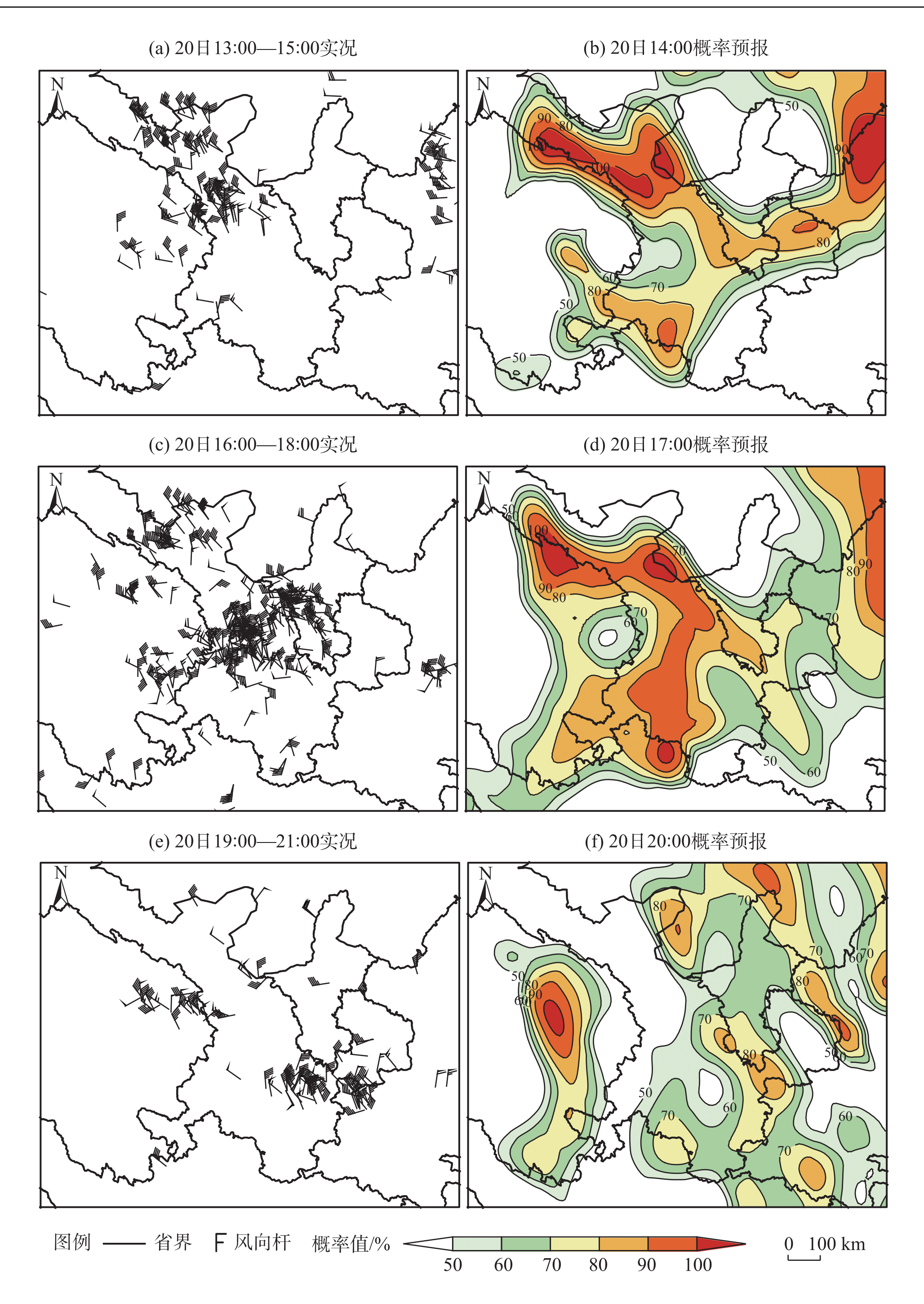


图5 2023年7月20日雷暴大风实况和概率预报

Fig. 5 Observations and probability prediction of thunderstorms on July 20, 2023

风实况（左）和概率预报落区（右）对比，实况为20日13:00—15:00、16:00—18:00、19:00—21:00，分别对应概率预报19日20:00起报到20日14:00、17:00、20:00。通过对比可见，20日13:00—15:00，雷暴大风主要出现在甘肃省张掖市南部、金昌市、武威市、兰州市、白银市等地（图5a），概率预报中心达到90%以上，但在甘南州东南部、白银市南部、平凉市、庆阳市等地预报概率偏大（图5b）。16:00—18:00，雷暴大风范围向南部扩大（图5c），概率预报大值区也向南伸展，两者总体表现基本一致，概率预报能较好地反映出实况落区，但在张掖市和金昌市两地预报范围略偏小（图5d）。19:00—21:00，实况偏北地区的雷暴大风减弱，偏南地区定西市、天水市、平凉市一带的雷暴大风发展（图5e），概率预报产品在

上述地区预报了70%左右的概率。同样，实况和预报在发展过程中，范围和强度的表现都基本一致(图5f)。因此，对于甘肃省较大范围的雷暴大风天气，基于EC集合预报资料的雷暴大风概率预报产品具有可参考性。

3 结论

(1) 甘肃省雷暴大风在甘南高原最为活跃，出现频次最高，河西和陇中是雷暴大风出现频次相对较高区域，陇东和陇南地区出现频次最低。雷暴大风月变化分析表明，海拔相对较高地区雷暴大风发生更早；甘南高原和陇中地区雷暴大风活跃阶段在4—8月，河西在5—7月。陇东雷暴大风活动峰值在7月，陇南在4月。

(2) 甘肃省雷暴大风主要出现在4—9月，其中5—7月出现次数占全年的65.3%，峰值出现在7月。雷暴大风在午后到傍晚出现的次数最多，集中出现在15:00—21:00，占全天的83.2%，17:00达到峰值，22:00以后发生次数明显减少，04:00—12:00很少有雷暴大风发生。甘肃省雷暴大风主要以8、9级大风为主，10级以上主要分布在河西地区和甘南高原。

(3) 根据强对流发生的必要条件，筛选出EC集合预报资料与甘肃省雷暴大风相关性较高的FH500、CAPE、*K*、W500等11个对流参数物理量，计算得到11个物理量中位数预报阈值，运用指标叠套法，得到雷暴大风的潜势预报概率产品。通过对甘肃省2次区域性雷暴大风过程检验，结果表明雷暴大风实况落区与概率预报50%以上的范围有较好的对应，且实况发展强度和范围变化趋势与概率预报具有较好的一致性，但对陇南市、天水市、平凉市和庆阳市等地存在空报，预报员需要根据具体的抬升触发条件进行订正。

参考文献(References)

[1] 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社, 2020: 298-299, 295. [Yu Xiaoding, Wang Xiuming, Li Wanli, et al. Near forecast of thunderstorm and severe convection [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2020: 298-299, 295.]

[2] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法—中国强对流天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 13-18. [Sun Jisong, Dai Jianhua, He Lifu, et al. Basic principles and technical methods of strong convective weather forecast: China strong convective weather forecast manual[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014: 13-18.]

[3] 肉孜·阿基, 于碧馨, 李如琦. 2019年8月阿克苏罕见翻山大风精细特征及成因分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 222-232. [Aji Rouzi, Yu Bixin, Li Ruqi. Fine characteristics and cause analysis of rare gale over Tianshan Mountains over Aksu Prefecture in August, 2019[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 222-232.]

[4] 高婧, 井立军, 李新东, 等. 新疆塔城地区雷暴时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理, 2010, 33(1): 37-44. [Gao Jing, Jing Lijun, Li Xindong, et al. Temporal and spatial distribution of thunderstorm and its change features in Tacheng Prefecture[J]. Arid Land Geography, 2010, 33(1): 37-44.]

[5] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. "东方之星"客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J]. 气象, 2016, 42(1): 1-13. [Zheng Yongguang, Tian Fuyou, Meng Zhiyong, et al. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship "Dongfangzhixing"[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(1): 1-13.]

[6] 侯淑梅, 李昱薇, 张鹏, 等. "4·29"山东近海10级以上雷暴大风的成因分析[J]. 气象, 2022, 48(10): 1242-1256. [Hou Shumei, Li Yuwei, Zhang Peng, et al. Cause of a thunderstorm gale event over grade 10 along the Shandong coast on 29 April 2021[J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(10): 1242-1256.]

[7] 陈晓欣, 俞小鼎, 王秀明. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究: 时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报, 2022, 80(1): 67-81. [Chen Xiaoxin, Yu Xiaoding, Wang Xiuming. A study of large-scale thunderstorm gale events (Derechos) in China: Spatiotemporal distribution, environmental background and convective system morphology[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2022, 80(1): 67-81.]

[8] 方翀, 王西贵, 盛杰, 等. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1368-1385. [Fang Chong, Wang Xigui, Sheng Jie, et al. Temporal and spatial distribution of north China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(5): 1368-1385.]

[9] 覃卫坚, 寿绍文, 王咏青, 等. 广西雷暴分布特征及灾害成因分析[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(2): 131-138. [Qin Weijian, Shou Shaowen, Wang Yongqing, et al. Analysis of distribution characteristics and damage causes of thunderstorm in Guangxi[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(2): 131-138.]

[10] 刘兆旭, 刘晶, 范子昂. 2005—2020年新疆雷电灾害特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1402-1414. [Liu Zhaoxu, Liu Jing, Fan Zi'ang. Characteristics of lightnings disasters in Xinjiang from 2005 to 2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1402-1414.]

[11] 许霖, 姚蓉, 王晓雷, 等. 湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 993-1000. [Xu Lin, Yao Rong, Wang

Xiaolei, et al. Study of temporal-spatial distribution and variation characteristics of thunderstorm gales in Hunan[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(4): 993-1000.]

[12] 柴东红, 杨晓亮, 吴紫煜, 等. 京津冀地区雷暴大风天气的统计分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(3): 193-199. [Chai Donghong, Yang Xiaoliang, Wu Ziyu, et al. The statistical analysis of thunderstorm gales over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Torrential Rain and Disasters, 2017, 36(3): 193-199.]

[13] 李力, 万雪丽, 齐大鹏, 等. 贵州省雷暴大风时空分布及对流参数特征分析[J]. 中低纬山地气象, 2020, 44(2): 1-8. [Li Li, Wan Xueli, Qi Dapeng, et al. Temporal and spatial distribution of Guizhou thunderstorm gales and the characteristic analysis of convective parameters[J]. Mid-low Latitude Mountain Meteorology, 2020, 44(2): 1-8.]

[14] 井宇, 陈闯, 赵强, 等. 陕西雷暴大风时空分布和气象条件分析[J]. 干旱气象, 2024, 42(4): 576-587. [Jing Yu, Chen Chuang, Zhao Qiang, et al. Spatial-temporal distribution and meteorological conditions of thunderstorm gales in Shaanxi[J]. Journal of Arid Meteorology, 2024, 42(4): 576-587.]

[15] 廖晓农, 于波, 卢丽华. 北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J]. 气象, 2009, 35(9): 18-29. [Liao Xiaonong, Yu Bo, Lu Lihua. Climatology and nowcasting methods for thunderstorm gale in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2009, 35(9): 18-29.]

[16] 柯元惠, 马明明, 郑艳, 等. 海南岛雷暴大风天气形势和环境参数特征分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(1): 86-93. [Ke Yuanhui, Ma Mingming, Zheng Yan, et al. Analysis of synoptic situation and environmental parameters of thunderstorm gales in Hainan[J]. Torrential Rain and Disasters, 2022, 41(1): 86-93.]

[17] 韦惠红, 许冠宇, 刘希文, 等. 湖北省不同类型雷暴大风的时空分布及环境参数特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(1): 66-75. [Wei Huihong, Xu Guanyu, Liu Xiwen, et al. Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm gales in Hubei Province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2022, 41(1): 66-75.]

[18] 严仕尧, 李昀英, 齐琳琳, 等. 华北产生雷暴大风的动力热力综合指标分析及应用[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(1): 17-23. [Yan Shiyao, Li Yunying, Qi Linlin, et al. Analysis and application of thermo-dynamical and dynamical indexes associated with thunderstorm gale in north China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(1): 17-23.]

[19] 王军德, 苏振娟, 张丽娜, 等. 甘肃省极端降水指数时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 270-276, 291. [Wang Junde, Su Zhenjuan, Zhang Lina, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of extreme precipitation index in Gansu Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 270-276, 291.]

[20] 谭丹, 黄玉霞, 沙宏娥. 甘肃省强对流天气特征分析[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 222-232. [Tan Dan, Huang Yuxia, Sha Hong'e. Characteristic analysis of severe convective weather in Gansu Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(2): 222-232.]

[21] 鲍文中, 张强, 陶健红, 等. 甘肃气候[M]. 北京: 气象出版社, 2018: 1-2, 122-123, 215-216. [Bao Wenzhong, Zhang Qiang, Tao Jianhong, et al. Gansu climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2018: 1-2, 122-123, 215-216.]

[22] 张宏芳, 巨晓璇, 卢珊, 等. 精细化网格的降水预报解析方法对比[J]. 气象科技进展, 2019, 9(3): 7-14. [Zhang Hongfang, Ju Xiaoxuan, Lu Shan, et al. Comparison of parsing methods for fine grid precipitation forecasting[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2019, 9(3): 7-14.]

[23] 费海燕, 王秀明, 周小刚, 等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12): 1513-1521. [Fei Haiyan, Wang Xiuming, Zhou Xiaogang, et al. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(12): 1513-1521.]

[24] 陈思容, 朱伟军, 周兵. 中国雷暴气候分布特征及变化趋势[J]. 大气科学学报, 2009, 32(5): 703-710. [Chen Sirong, Zhu Weijun, Zhou Bing. Climate characteristic and variation tendency of thunderstorm in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(5): 703-710.]

[25] 王宝鉴, 刘维成, 黄玉霞, 等. 1961—2011年甘肃雷暴气候分布特征及变化趋势[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5): 1346-1352. [Wang Baojian, Liu Weicheng, Huang Yuxia, et al. Climate distribution characteristics and trends of thunderstorm during 1961—2011 in Gansu, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(5): 1346-1352.]

[26] 尤伟, 臧增亮, 潘晓滨, 等. 夏季青藏高原雷暴天气及其天气学特征的统计分析[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1523-1529. [You Wei, Zang Zengliang, Pan Xiaobin, et al. Statistical analyses on characteristic and environmental aspect of summer thunderstorm over the Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(6): 1523-1529.]

[27] 央美, 旦增格列, 达瓦泽仁, 等. 那曲地区雷暴天气时空变化特征及影响因素[J]. 应用气象学报, 2014, 25(6): 751-760. [Yang Mei, Danzeng Gelie, Dawa Zeren, et al. The trend and distribution of thunderstorm activity and influencing factors in Nagqu Prefecture[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(6): 751-760.]

[28] 雷蕾, 孙继松, 魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 2011, 37(2): 136-141. [Lei Lei, Sun Jisong, Wei Dong. Distinguishing the category of the summer convective weather by sounding data in Beijing[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(2): 136-141.]

Characteristic and potential prediction of thunderstorm in Gansu Province

TAN Dan[1], NIE Canqi[2,3], HUANG Wubin[1], LI Wenyao[1], XIE Lijun[1]

(1. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. Chengkou Meteorological Bureau, Chongqing 405900, China; 3. China Meteorological Administration Key Open Laboratory of Transforming Climate Resource to Economy, Chongqing 401147, China)

Abstract: Based on hourly extreme wind speed and lightning localization data from 2115 observation stations in Gansu Province, China for the period from 2017 to 2021, combined with ECMWF ensemble forecasting data, the temporal and spatial distribution characteristics as well as the convective parameter characteristics of thunderstorm were analyzed. The potential prediction of thunderstorm was conducted using a multi-index nested method. The results indicate that thunderstorm primarily occur from April to September, with the highest frequency from May to July, accounting for 65.3% of the total occurrences. The hourly occurrence of thunderstorm is concentrated between 15:00 and 21:00, peaking at 17:00. The spatial distribution of thunderstorm is strongly influenced by the terrain in Gansu Province. Spatially, the frequency of thunderstorm decreases from west to east. Thunderstorm are more frequent in plateaus than in valleys, with the highest occurrences observed in the Gannan Plateau and the lowest in southeastern Gansu Province. Thunderstorm in Gansu Province predominantly fall into categories 8 and 9, while those above category 10 mainly occur in the Hexi Region and Gannan Plateau. Potential forecast probability products for thunderstorm in Gansu Province were obtained based on convective parameters and indicator threshold. Test results reveal a strong concurrence between the forecasted and actual occurrence areas, providing a significant reference value to improve the thunderstorm forecast in Gansu Province.

Key words: thunderstorm; characteristic; potential prediction; Gansu Province